



**Licenciatura em Física
Instituto de Física
UFRJ**

PROJETO FINAL DE CURSO

**MEDINDO A VELOCIDADE DO SOM COM O
MICROFONE DO PC**

Marco Antonio B. Freitas

**Orientador:
Carlos Eduardo Aguiar**

Julho 2005

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	4
2. PEQUENA HISTÓRIA DO SOM	5
3. A VELOCIDADE DO SOM NO LABORATÓRIO DIDÁTICO.....	12
<u>3.1. Medidas por ressonância</u>	12
<u>3.2. Medidas diretas da velocidade do som</u>	14
4. AS ENTRADAS MIC E LINE-IN	16
5. O CONTROLE DE VOLUME DO WINDOWS.....	18
6. O GRAVADOR DE ÁUDIO	21
7. ANÁLISE DOS DADOS	23
8. COMENTÁRIOS FINAIS.....	25
APÊNDICE A	26
REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

Os raios geralmente são vistos antes de serem ouvidos. Esta observação corriqueira demonstra que o som não se propaga instantaneamente, e sim com uma velocidade finita. Mas qual é esta velocidade? Os antigos não parecem ter se ocupado muito com a questão; um dos poucos a tratar da propagação do som foi Aristóteles que afirmava (erroneamente) que os sons agudos viajavam mais rápido que os graves. As primeiras medidas da velocidade do som tiveram que esperar pela Renascença, e foram realizadas em 1635 pelo filósofo francês Pierre Gassendi. Ele observou o disparo de um canhão localizado a uma distância conhecida, e mediu o tempo entre as chegadas do clarão e do som. Com isso ele obteve 478 m/s para a velocidade do som, um valor um tanto alto. Gassendi também mostrou de forma conclusiva que os sons graves e agudos têm a mesma velocidade, contradizendo Aristóteles. Muito outros experimentos seguiram-se ao de Gassendi; o próprio Newton fez uma medida da velocidade do som cronometrando ecos no pátio do Trinity College. Em 1738 uma equipe da academia de Ciências parisiense, usando disparos de canhão como Gassendi, encontrou um resultado notadamente preciso: 344 m/s, a uma temperatura de 20°C. A preocupação com a temperatura é importante, pois mais ou menos à mesma época Branconi demonstrou que a velocidade do som aumenta com a temperatura. Medidas modernas dão para a velocidade do som a 0°C o valor

$$c_0 = 331,45 \pm 0,05 \text{ m/s} \quad (1.1)$$

O valor acima é válido para o ar seco em condições normais de pressão. A uma temperatura absoluta T a velocidade do som é

$$c = c_0 \sqrt{T/T_0} \quad (1.2)$$

onde $T_0 = 273,15 \text{ K}$ é a temperatura Kelvin correspondente a 0°C. A 20°C a velocidade prevista pela equação acima é 343,4 m/s, o que mostra a qualidade da medida francesa de 1738. A temperaturas próximas da ambiente, a velocidade do som cresce aproximadamente 0,6 m/s por grau centígrado. A presença de umidade no ar também aumenta a velocidade do som, mas o efeito é bem menor que o da temperatura [1].

Este trabalho descreve um experimento simples para medir a velocidade do som no ar, utilizando os recursos de áudio de um computador do tipo PC. A principal característica do método proposto é a simplicidade: o experimento é muito fácil de entender e montar, o que o torna particularmente interessante para um laboratório de ensino médio.

A estrutura desta monografia é a seguinte. Na seção 2, apresentamos uma breve história da Acústica. Na seção 3 discutimos alguns métodos usados em laboratórios didáticos para medir a velocidade do som, e apresentamos nossa proposta experimental. A utilização dos microfones e placa de som do PC é tratada na seção 4. Os programas de gravação de som usados no experimento são discutidos nas seções 5 e 6, e o programa de edição de áudio que utilizamos na análise dos dados é descrito na seção 7. Na seção 8 apresentamos o resultado de medidas feitas com o método proposto, e na seção 9 fazemos alguns comentários finais.

2. PEQUENA HISTÓRIA DO SOM

Apresentaremos nesta seção uma breve história de nosso conhecimento sobre o som. O material utilizado aqui vem essencialmente do que está em:

<http://gestaodoruido.no.sapo.pt/HistoriaRelativaSom.htm>

Um dos primeiros relatos escritos de um fenômeno acústico está na Bíblia, onde Josué descreve o cerco dos hebreus a Jericó (há cerca de 3220 anos), e a famosa “ressonância” que botou abaixo as muralhas da cidade (Josué cap. 6, vs. 20): *Então, quando começaram a tocar as trombetas, o povo gritou. E sucedeu que, assim que o povo ouviu o som das trombetas e o povo começou a dar um grande grito de guerra, então a muralha começou a cair rente ao chão...*

Só existem registros de trabalhos relativos ao som a partir da Grécia antiga (há cerca de 2500 anos), quando grandes pensadores começam a tentar dar resposta às perguntas mais prementes. Assim, Aristóteles (384-322 a.C.) é um dos primeiros a tentar explicar o som como o resultado do movimento do ar, movimento este produzido pela fonte sonora: *impulsionando o ar à sua volta, de maneira a que o som viaje de forma inalterada, em qualidade, até onde a perturbação do ar chegue.*

Aristóteles considera – erroneamente de acordo com os conceitos atuais – que as diferentes sensações de altura se devem a diferenciadas velocidades do som.

Os pitagóricos (c. 550 a.C.) repararam que quando dois alaúdes monocórdios eram tocados ao mesmo tempo, existia uma consonância muito especial, no som assim ouvido, se a relação entre o comprimento das suas cordas fosse 2:1, ou seja, uma tivesse metade do comprimento da outra (suspeita-se que os chineses tenham sido os primeiros a constatar tal fato, possivelmente há mais de 3000 anos). Os pitagóricos dão, assim, início à matematização do som.

O maior testemunho dos conhecimentos gregos sobre acústica são os seus anfiteatros, alguns ainda utilizados hoje em dia. Também os Romanos têm em conta características acústicas para a construção dos seus teatros. Marcus Vitruvius Pollio (c. 27 d.C.) escreve *De Architectura*, onde sugere o uso de vasos ressonantes para melhorar o som dos teatros.

Existem registros datados de cerca de 600 a.C., de algumas cidades italianas, sob o domínio etrusco, que separavam as zonas de trabalho, onde predominava ruído incomodativo, das zonas de repouso. Mais tarde, Júlio César (100-44 a.C.) proíbe a circulação das bigas em certas zonas de Roma, especialmente à noite. Esta medida foi mantida pelos seus sucessores e Marco Aurélio (121-180 d.C.), estende-a a todas as cidades do Império Romano.

O conceito de altura do som, e sua utilização na composição musical, existe há mais de 2500 anos, mas só com Marin Mersenne (1588-1648), no seu livro *Harmonicorum Liber* (1636), e, independentemente, com Galileo Galilei (1564-1642), no seu livro *Discurso sobre os Dois Grandes Sistemas do Mundo* (1638), se associou definitivamente a altura do som à frequência de vibração. É inclusive no livro de Mersenne que é inferida, pela primeira vez, a frequência de vibração de uma corda tensa, de um dado comprimento, em função da frequência de vibração de uma outra corda tensa, com as mesmas características da primeira (tensão, diâmetro e densidade) e de comprimento conhecido.

Depois de encontrada a relação entre a altura do som e a frequência de vibração, começou o interesse pela determinação das frequências limites da audição humana; mas só em 1830, Felix Savart (1791-1841), mediante a utilização de uma roda dentada, que percute seqüencialmente uma membrana elástica, estabelece o valor de 8 Hz para a frequência mínima audível e 24000 Hz para a frequência máxima. Tais valores limites são subjetivos, considerando-se em média, atualmente, 20Hz e 20000 Hz.

Um desafio idêntico ao anterior é a determinação do limite mínimo da intensidade sonora audível. Os primeiros estudos que se conhecem, da autoria de Toepler (1836-1912) e Boltzmann (1844-1906), remontam a 1870.

A consideração aristotélica da necessidade do ar para a propagação sonora é posta em causa, sobretudo devido à não visualização ou palpabilidade da vibração do ar, por Pierre Gassendi (1592-1655), que propõe que o som se deve à emissão de um feixe de átomos por parte da fonte sonora. O conflito entre o modelo corpuscular e o modelo ondulatório tem pouco peso na história relativa ao som, contrariamente ao que acontece na Ótica. A primeira experiência de propagação sonora no vácuo, de Athanasius Kircher (1602-1680), publicada em 1650, deu suporte ao modelo de Gassendi, devido a um baixo nível de vácuo. A experiência de Robert Boyle (1627-1691), em 1660, com um maior nível de vácuo, demonstrou irrefutavelmente, ser necessária a existência de ar para que haja propagação sonora, fazendo com que o modelo ondulatório prevalecesse.

Talvez para remediar a sua falha experimental, Athanasius Kircher explica, no seu livro *Phonurgia Nova* (1673), o fenómeno do eco e da reflexão sonora, mediante a utilização de raios acústicos, com base na lei de reflexão da luz de Euclides (c. 330-270 a.C.) – lei esta consolidada e complementada por Willebrod Snell (1591-1626) e René Descartes (1596-1650) – e dá início à Acústica Geométrica.

As primeiras teorias matemáticas da acústica tratam da frequência de vibração das cordas tensas, sendo Brook Taylor (1685-1731) – o criador das famosas séries com o seu nome – o primeiro a deduzir uma expressão analítica para determinação da frequência de vibração das cordas tensas, em função do seu comprimento, tensão e densidade linear, a qual concordava com as leis experimentais de Mersenne e Galileo. O trabalho de Taylor foi publicado em 1713, tendo sido posteriormente aperfeiçoado e generalizado, mediante a introdução de derivadas parciais, por Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonard Euler (1707-1783) e Jean le Rond d'Alembert (1717-1783). Considera-se que d'Alembert foi o primeiro a deduzir, em 1747, para o caso das cordas vibrantes, a equação diferencial da propagação ondulatória, atualmente denominada simplesmente por equação de onda.

Entretanto, Sauveur, por volta de 1700, observa que uma corda tensa pode vibrar de forma a que certos pontos da corda não oscilem, os quais denominou por nós, e que certos pontos sofram uma oscilação muito violenta, os quais denominou por ventres. Facilmente reconheceu que esse tipo de vibração se devia à ocorrência de frequências superiores à frequência de vibração da corda como um todo, e verificou que as frequências mais altas eram múltiplas inteiras da frequência mais baixa, correspondente à vibração da corda como um todo, a qual denominou por

freqüência fundamental. Sauver denominou o conjunto de todas essas freqüências por *harmônicos*, correspondendo o 1º harmônico à freqüência fundamental. Tal denominação é ainda utilizada atualmente.

Em 1755, Daniel Bernoulli demonstra teoricamente que é possível a uma corda tensa vibrar de forma a que estejam presentes, simultaneamente, vários harmônicos, sendo o deslocamento, de um dado ponto da corda, igual ao resultado da soma algébrica dos deslocamentos correspondentes a cada harmônico. Tal formulação ficou conhecida por princípio da superposição.

Em 1759, Joseph Louis Lagrange (1736-1813) apresenta um modelo teórico das cordas vibrantes, baseado na consideração de massas iguais, uniformemente espaçadas e ligadas entre si por molas com a mesma constante elástica. Este modelo teve e tem grandes aplicações, e permite a dedução dos harmônicos observados por Sauveur.

Em 1822, Jean Baptiste Fourier (1768-1830), no seu livro *Teoria Analítica do Calor*, demonstrou, inspirado no princípio da superposição de Bernoulli, que qualquer vibração periódica pode ser decomposta numa soma de senos e cosenos (série de Fourier), cujas diferentes freqüências são múltiplos inteiros da freqüência fundamental.

A primeira teoria matemática da propagação sonora no ar surge no *Mathematical Principles of Natural Philosophy* (1686) de Isaac Newton (1642-1727). A formulação de Newton, de pulsos de “pressão” transmitidos através das partículas de ar vizinhas, foi aperfeiçoada e corrigida, em alguns pontos, por Euler, d’Alembert e Lagrange.

A primeira teoria baseada genuinamente em princípios de dinâmica dos fluidos, surge numa publicação de Euler em 1759. Nessa publicação Euler deduz a equação de onda, unidimensional, da propagação sonora em fluidos.

A formulação do século XVIII é ainda considerada hoje em dia, para dedução da equação de propagação das ondas sonoras em fluidos – considerando pequenas amplitudes de perturbação (acústica linear) – aparte da relação entre a densidade e a pressão, obtida já no séc. XIX, por Pierre Simon de Laplace (1749-1827) e publicada no seu livro *Mécanique Céleste* (1825).

A diferença essencial entre a formulação do séc. XIX e a do séc. XVIII é a consideração de um processo adiabático no lugar de um processo isotérmico. Esta consideração originou valores teóricos da velocidade do som mais próximos dos valores experimentais, até então obtidos por Mersenne, em 1640 (450 m/s), Boreli (1608-1679) e Viviani (1622-1703), em 1656

(350 m/s), e pela Academia das Ciências de Paris, em 1738, mediante experiências precisas com tiros de canhão (332m/s a 0°C).

Em 1808, Jean Baptiste Biot (1774-1862) efetua as primeiras experiências para determinação da velocidade do som em meios sólidos. Utilizando um cano de ferro com 1 km de comprimento e comparando o tempo de chegada do som através do ferro e através do ar, Biot chega à conclusão que a velocidade do som no ferro é muito superior à velocidade do som no ar. Em 1826, Jean-Daniel Colladon e Jacques Charles Francois Sturm (1803-1855), investigam a transmissão do som através da água, no lago de Geneva (Suíça), utilizando um sistema em que é emitido um sinal luminoso associado ao tocar de um sino dentro de água (1435 m/s a 8°C).

A dedução da propagação tridimensional em fluidos foi efetuada por Siméon Denis Poisson (1781-1840), em 1820. Em 1823 Poisson apresenta uma teoria muito elaborada da propagação sonora no ar, no interior de um tubo, incluindo o fenómeno das ondas estacionárias. A teoria é aperfeiçoada por Herman von Helmholtz (1821-1894), em 1860.

O difícil problema da reflexão e refração de ondas sonoras planas, incidindo obliquamente na superfície de separação de dois fluidos, foi resolvido por George Green (1793-1841), em 1838.

Em 1842, Christian Johann Doppler (1803-1853), enuncia o princípio da alteração da altura do som em função do movimento relativo da fonte e do receptor. Tal princípio ficou conhecido por efeito Doppler.

Os efeitos da viscosidade, e outros processos dissipativos, na propagação sonora, foram analisados em 1843 por Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e, em 1845, por George Gabriel Stokes (1819-1903), culminando numa equação de relações constitutivas do fluido, conhecida por equação Navier-Stokes. Stokes estudou, em 1857, o efeito do vento na propagação sonora.

Em 1868, A. Kundt (1839-1894), estuda as ondas estacionárias mediante a colocação de pó dentro dos tubos, o qual se acumulará na zona dos nós. Tal experiência ficou conhecida por tubo de Kundt.

A relação entre a tensão e a deformação elástica de sólidos, obtida por Robert Hooke (1635-1703) em 1676, conhecida por Lei de Hooke, foi essencial para a adaptação, aos sólidos, dos modelos analíticos desenvolvidos para as cordas tensas e para os fluidos. Tal adaptação não foi, contudo, fácil. Assim, Bernoulli em 1751, deduz a equação diferencial de 4ª ordem (no

espaço) para as ondas transversais em barras. Em 1787, Chladni (1756-1824), coloca areia em cima de uma placa em vibração, para verificação da localização dos nós, obtendo figuras muito bonitas, conhecidas por Figuras de Chladni. As figuras tornam-se de tal forma famosas que Napoleão Bonaparte (1769-1821) compromete-se a atribuir um prêmio, de 3000 francos, a quem conseguir desenvolver, satisfatoriamente, uma teoria matemática para as placas vibrantes. O prêmio foi atribuído, em 1815, a Sophie Germain (1776-1831), que deduziu a correta equação diferencial de 4ª ordem. Em 1850, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), através de uma correta seleção das condições de fronteira, aperfeiçoou a teoria de Germain.

A resolução do problema análogo ao referido, para membranas flexíveis, foi iniciada por Poisson e terminada, mediante a consideração do caso especial das membranas circulares, por Clebsch (1833-1872), em 1862.

Os modos de vibração dos sólidos, conjugados com o advento da Mecânica Quântica, fazem com que, em 1912, Peter Joseph Debye (1884-1966) quantifique as ondas sonoras e introduza o conceito de fonon, o qual é muito útil na explicação da condutividade térmica dos isolantes elétricos e na explicação da supercondutividade em certos metais.

Em 1877, John William Strutt, 3º Barão de Rayleigh (1842-1919), publica o tratado *Theory of Sound*, que engloba grande parte dos desenvolvimentos científicos da acústica, até então, e introduz novos desenvolvimentos, como o conceito de condutividade acústica de um orifício, a função de dissipação, para um sistema sujeito a amortecimento, o teorema da reciprocidade acústica e a representação complexa.

Depois de deduzidas algumas das equações de propagação do som, a comunidade científica começou a tentar perceber como o sistema auditivo humano “analisa” as vibrações. Em 1843, Georg Simon Ohm (1789-1854), estabelece que a sensação de altura, de sons musicais, é proporcional à frequência fundamental do som, e o timbre a diferentes combinações da intensidade dos harmônicos, e inicia o ramo da Psicoacústica.

Em 1860, Gustav Theodor Fechner (1801-1884), baseado em trabalhos anteriores de Ernst H. Weber (1795-1878), publica *Elements of Psychophysics*, onde estabelece o seguinte: Enquanto o estímulo é aumentado multiplicativamente a sensação é aumentada aditivamente. Tal lei ficou conhecida por lei de Fechner-Weber. Ainda que se saiba, atualmente, que não é exata nem universal, tal lei é um pilar da Psicofísica.

Dois anos depois (1862), Helmholtz publica *On the Sensations of Tone*, onde dá suporte à lei de Ohm, considerando que o ouvido humano possui vários ressonadores, sintonizados para diferentes frequências, efetuando assim uma análise espectral. Sabe-se hoje que Ohm e Helmholtz estavam no bom caminho, mas o processamento cerebral, da audição, é mais complexo que uma “simples” transformação de Fourier.

Só em 1923, Harvey Flecher, possivelmente inspirado no trabalho de Fechner, introduz o conceito de *Unidade de Sensação Auditiva*: um incremento de 0.1 no logaritmo, de base 10, do valor médio do quadrado da pressão sonora, corresponde a um aumento de uma unidade de sensação. Em 1924 The International Advisory Committee on Long Distance Telephony propõe o termo *bel*, em honra a Alexander Graham Bell (1847-1922), o inventor do telefone, para a unidade de sensação de Flecher. Passado pouco tempo, o décimo do bel (decibel, dB), é de utilização generalizada.

Em 1931, Flecher e Wallace Munson determinam as curvas de igual sensação de intensidade, em função da frequência, e introduzem o conceito de *fone*. Em 1975, S. S. Stevens estabelece uma relação mais rigorosa entre a intensidade sonora e a sensação de intensidade, introduzindo o conceito de *sone*.

A 2ª Guerra Mundial que leva ao desenvolvimento dos sonares, cuja utilização de ultrassom abre portas às técnicas não destrutivas de análise.

Outra das áreas que o séc. XX consagrou foi a acústica de espaços fechados (acústica de edifícios). Ainda que este tema remonte à Grécia e Roma antigas, pode considerar-se que o advento moderno começou em 1898, quando Wallace Clement Sabine (1868-1919) publicou *Architectural Acoustic*, onde é obtida uma expressão analítica para obtenção do tempo de reverberação. Em 1951, H. Haas constata que é necessária uma diferença de 35 ms para que o ser humano possa distinguir a chegada de dois sons. Tal efeito ficou conhecido por efeito de Haas ou efeito de precedência, e é de vital importância para a estereofonia de salas. Leo Leroy Beranek, em 1962, publica *Music, Acoustics and Architecture*, onde relaciona conceitos subjetivos da qualidade acústica de uma sala com características objetivas (por ex., tempo de atraso da 1ª reflexão, relativamente ao som direto, e tempo de reverberação).

Em 1960, Clough introduz o conceito de *elemento finito*, que com o advento dos computadores se verificou ser de vital importância e enorme aplicação em vários domínios científicos, inclusive na acústica.

A instrumentação acústica, deixando de fora os instrumentos musicais, começou, talvez, em 1819, com a invenção do estetoscópio, por René Laënnec (1781-1826). Contudo, indubitavelmente, o invento mais importante foi o telefone, em 1876, por Alexander Graham Bell, o qual abriu portas ao importante ramo da Electroacústica. Poulsen, em 1890, faz as primeiras experiências de gravação áudio em suporte magnético. Em 1916 E. C. Wente desenvolve o microfone de condensador.

Em 1987, começam os estudos de compressão áudio, baseados nos conhecimentos já existentes de Psicoacústica, que originam o conhecido formato MP3.

3. A VELOCIDADE DO SOM NO LABORATÓRIO DIDÁTICO

A medida da velocidade do som é um experimento comum em laboratórios didáticos. Quase todos os métodos de medida podem ser classificados em uma de duas categorias: primeiro os que envolvem a observação de ressonâncias [2-7], e aqueles em que a velocidade é medida diretamente [8-18]. Na próxima subseção discutiremos as medidas por ressonância, e na subseção seguinte abordaremos os métodos diretos, entre os quais está o que propomos neste trabalho.

3.1. Medidas por ressonância

Via a observação de ressonâncias, a velocidade do som pode ser obtida por dois métodos: (1) dada a frequência, determinamos o comprimento de onda, ou, (2) dado o comprimento de onda, determinamos a frequência. Nos dois casos a velocidade do som será dada por

$$c = \lambda f \quad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda e f a frequência.

As medidas por ressonância têm como principal vantagem o fato de serem fáceis de realizar. Sua desvantagem é que envolvem conceitos pouco familiares aos alunos do ensino médio, como ressonância, condições de contorno, ondas estacionárias, etc.

Um exemplo de medida com o método (1) está descrito no trabalho de M. Cavalcante e C. Tavoraro [2], e é realizado colocando-se um diapasão de frequência conhecida próximo à boca de um tubo contendo água, como mostrado na Figura 3.1. Pode-se variar o nível de água no tubo, até se ouvir um reforço na intensidade do som que sai do tubo. Esse reforço, ou ressonância, deve-se à formação de uma onda estacionária na coluna de ar, de comprimento L , existente entre o nível

da água e a boca do tubo. No primeiro reforço observado (menor L), a coluna de ar terá uma altura correspondente a um quarto do comprimento de onda do som, como ilustrado na Figura 3.1 (da ref. [2]). Portanto, como

$$\lambda = 4 L \quad (3.2)$$

a velocidade do som será

$$c = 4 L f \quad (3.3)$$

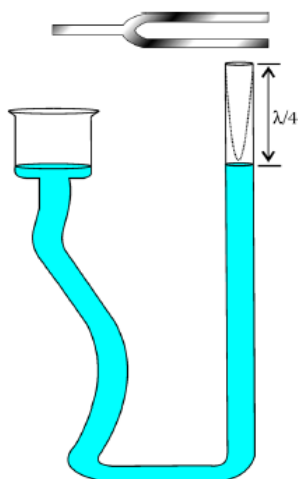


Figura 3.1

Um exemplo do segundo método também pode ser encontrado nas ref. [2], e está baseado num analisador de espectro de áudio. Espectrômetros sonoros são equipamentos caros, mas com um computador, placa de som, microfone, e software adequado, pode-se fazer um espectrômetro bem razoável. Estão disponíveis na Internet vários programas que podem determinar as frequências presentes em um sinal sonoro captado pela placa de som do computador. A experiência consiste em colocar o microfone do computador próximo a uma das extremidades de um tubo, e fazer algum ruído na outra extremidade (figura 3.2). A figura 3.2 mostra o espectro do som produzido no tubo.

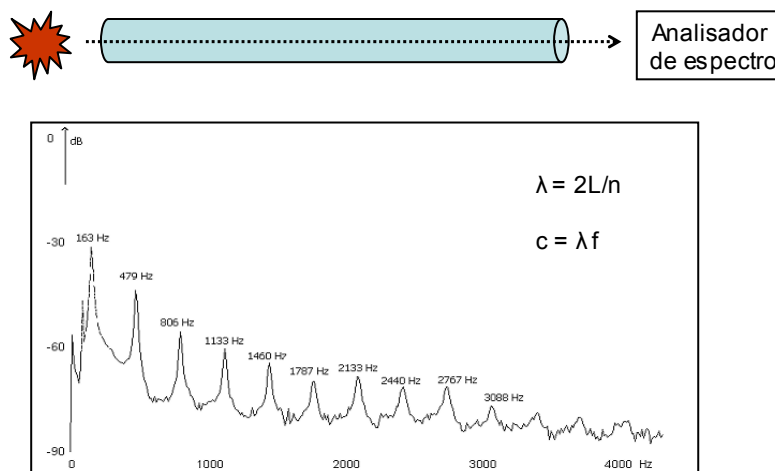


Figura 3.2

Para um tubo de comprimento L , com extremidades abertas, os comprimentos de onda ressonantes são dados pela condição

$$L = n \lambda / 2 \quad (3.3)$$

onde $n = 1, 2, 3 \dots$. As frequências correspondentes são

$$f = n c / (2 L) \quad (3.4)$$

Identificando essas frequências aos picos medidos com o espectrômetro podemos calcular a velocidade do som.

3.2. Medidas diretas da velocidade do som

Nos métodos diretos se mede o tempo que o som leva para percorrer uma certa distância, ou a distância percorrida num dado tempo (ou mudança de fase) [8-18]. Estes experimentos são descendentes diretos do tiro de canhão de Gassendi, onde a velocidade do som é obtida pela razão entre uma distância e o tempo gasto para percorrê-la. Não há grandes dificuldades conceituais nestes experimentos, mas eles tendem a serem mais difíceis de montar – como o som percorre centenas de metros por segundo, se usarmos cronômetros manuais temos que colocar a fonte sonora muito distante do observador; se queremos fazer o experimento dentro de um laboratório temos de ser capazes de medir frações de milissegundo.

Um exemplo deste tipo de medida está descrito no trabalho de V. Barbeta e C. Marzulli [8]. O esquema do experimento está mostrado na figura 3.3. O gerador produz uma onda

quadrada que é mandada para o alto-falante, e que também dispara a varredura do osciloscópio. O microfone capta o som do alto-falante e envia o sinal elétrico resultante para o osciloscópio. Modificando a posição do alto-falante, o tempo que o som leva para chegar ao microfone muda, e esta mudança pode ser medida no osciloscópio, fornecendo a velocidade do som.

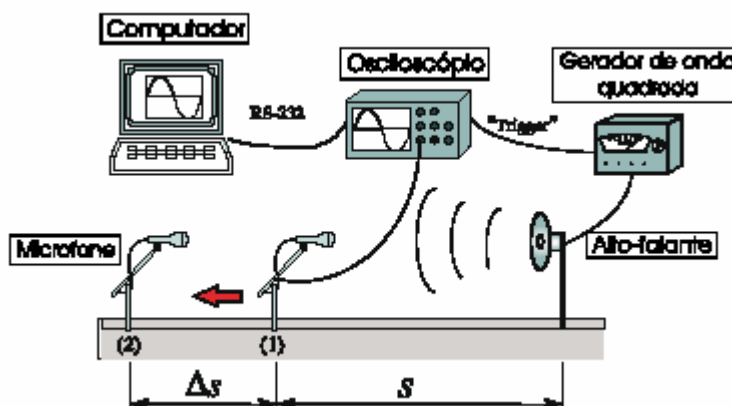


Figura 3.3. Esquema de uma medida direta da velocidade do som [8].

No presente trabalho nós descrevemos uma montagem bem mais simples para este tipo de medida: colocamos dois microfones a uma distância bem determinada um do outro, e os conectamos em estéreo à placa de som do PC (cada microfone em um canal). Em seguida estouramos um balão de festa, cuidando para que os microfones e o balão estejam alinhados em uma reta. A montagem está descrita na figura 3.4. O barulho da explosão é gravado nos dois canais por um programa de gravação, e os instantes de chegada do som a cada microfone são obtidos analisando-se o arquivo de áudio gerado. Com isto tem-se quanto tempo o sinal levou para ir de um microfone a outro. Como a distância é conhecida, a velocidade é facilmente calculada. A análise dos sinais e a determinação do tempo entre eles são realizadas com um editor de arquivos de som (Goldwave). A figura 3.5 mostra o resultado de uma medida realizada com esse método.

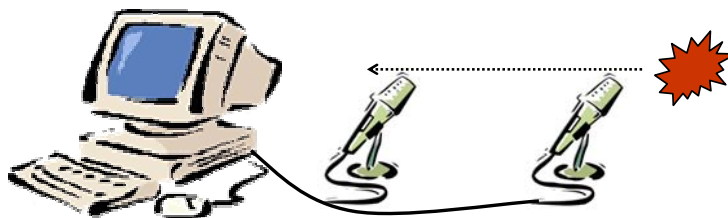


Figura 3.4. Medida da velocidade do som com dois microfones.

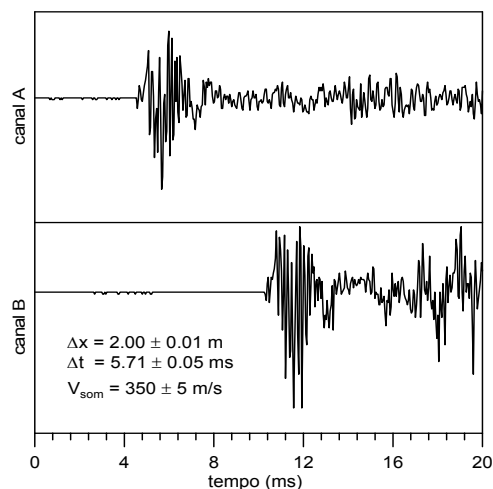


Figura 3.5. Resultado da medida com os dois microfones.

4. AS ENTRADAS MIC E LINE-IN

Para montar o experimento proposto acima precisamos saber um pouco sobre o microfone do PC. O tipo que acompanha as placas de som comuns é um microfone de eletreto ligado a um pino P2 estéreo (com três segmentos: ponteira, anel e manga). Estes microfones são sempre conectados à entrada MIC da placa de som, tipicamente no arranjo mostrado na figura 4.1. Note que o sinal proveniente da ponteira tem suas componentes de baixa frequência filtradas antes de ser amplificado pela placa de som. Importante para nós é o fato de que uma tensão de 5 V deve ser aplicada ao microfone para que ele funcione a contento. A corrente gerada por esta tensão é limitada por uma resistência de 2 k Ω .

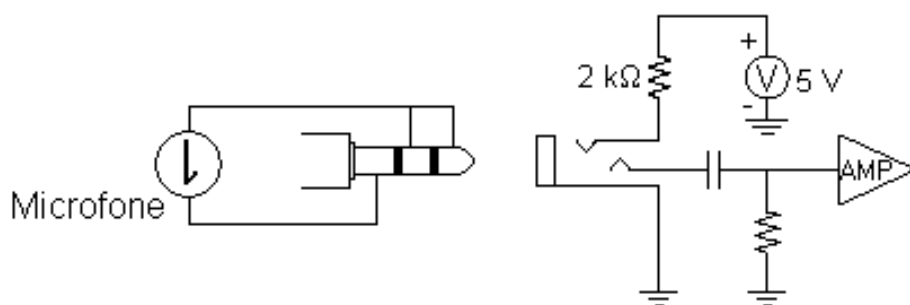


Figura 4.1. O microfone do PC e os circuitos da entrada MIC da placa de som.

A entrada MIC da placa de som não tem muita utilidade para nós, pois como podemos ver na figura 4.1 ela não aceita sinais em estéreo (apesar de usar o pino P2 estéreo). Para isso temos de utilizar a entrada LINE-IN da mesma placa, que também é desenhada para pinos P2 estéreo, mas com a configuração mostrada na figura 4.2. O canal esquerdo é captado na ponteira, o canal direito no anel, e a manga ligada à terra.

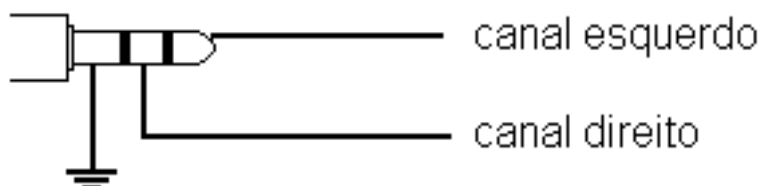


Figura 4.2. Conexões do pino P2 na entrada LINE-IN da placa de som.

A entrada LINE-IN é usada para conectar o PC à saída de linha de equipamentos de áudio, como tocadores de CD ou fita cassete. Ela não é própria para o microfone do PC por dois motivos: (1) ela não fornece a tensão de 5 V necessária ao bom funcionamento do microfone, e (2) ela está projetada para receber sinais na faixa de 0,2 a 2 V, mais fortes que os do microfone, que são tipicamente de 10-100 mV. Para remediar esses problemas ligamos cada microfone a um circuito como mostrado na figura 4.3, que fornece a tensão de 5V e amplifica o sinal. Note que no esquema da fig. 4.3 o sinal do microfone vai para o canal esquerdo (ponteira). A saída para o canal direito (anel) está desconectada e não recebe sinal. O circuito do amplificador está descrito no Apêndice A.

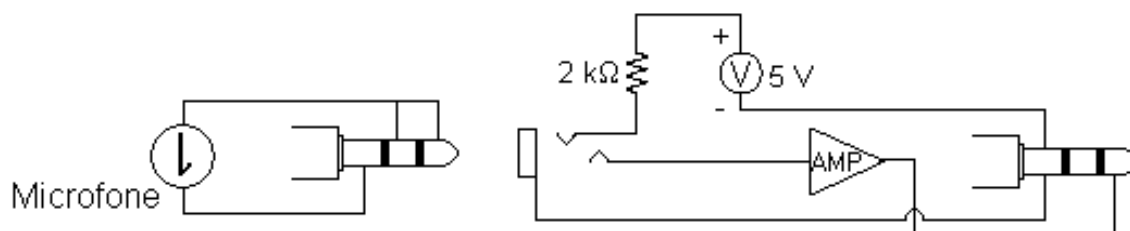


Figura 4.3. Circuito para adaptar o microfone do PC à entrada LINE-IN.

O circuito para o microfone que alimenta o canal direito é semelhante ao da figura 4.3, com a diferença que a saída do amplificador está ligada ao anel, e a ponteira fica desconectada. A

ligação dos dois microfones à entrada LINE-IN é realizada com um conector em Y (fig. 4.4) que soma os sinais de dois pinos estéreo (A e B) canal a canal.



Figura 4.4. Conector usado para ligar dois microfones à placa de som.

Um circuito adaptador ainda mais simples foi usado por Rita Grala e Elisandra Oliveira, da UFRGS, em um experimento semelhante ao nosso. Elas não usam o amplificador, e compensam isso com uma tensão mais alta na fonte (12 V em vez de 5 V). O circuito utilizado por elas está mostrado na fig. 4.5. Mais detalhes sobre esse trabalho podem ser obtidos em <http://www.if.ufrgs.br/cref/ntef/som/lab/linein/index.html>

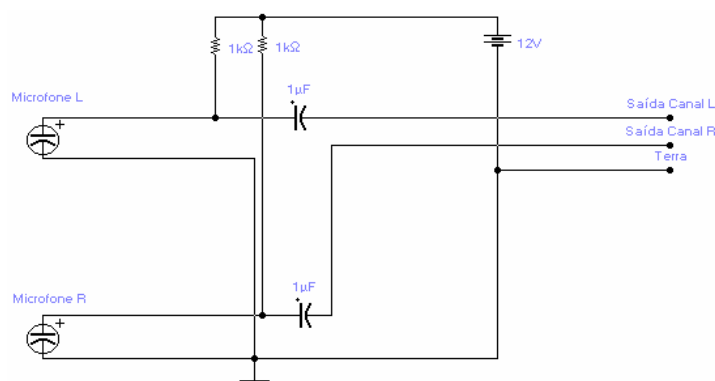


Figura 4.5. Circuito usado por R. Grala e E. Oliveira em um experimento com dois microfones.

5. O CONTROLE DE VOLUME DO WINDOWS

O material desta seção, e da próxima, reproduz partes do artigo de Laércio Vasconcelos (www.laercio.com.br), *Usando a Placa de Som*, disponível em:

<http://www.laercio.com.br/site2/artigos/HARDWARE/hard-064/hard-064.htm>

O programa *Controle de Volume* serve para selecionar quais das entradas e saídas sonoras da placa de som devem ser usadas, e também escolher o seu volume. Por exemplo, ao fazer uma gravação, podemos selecionar o microfone com volume de 100% e o CD de áudio com volume de 30%. O Controle de Volume é um tipo especial de programa que chamamos genericamente de

mixer (ou misturador). O Controle de Volume é encontrado no menu *Entretenimento*, e também pode ser executado aplicando um clique duplo no ícone do alto-falante existente na barra de tarefas, ao lado do relógio. A figura 5.1 mostra o controle de volume no Windows 9x/ME, e a figura 5.2 mostra o controle de volume no Windows XP.



Figura 5.1. O Controle de Volume no Windows 9x/ME.

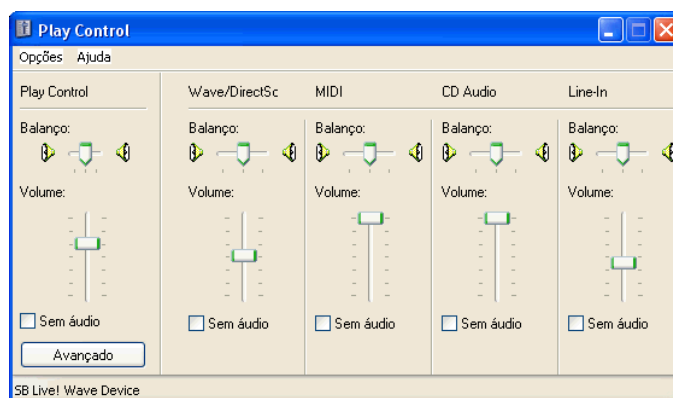


Figura 5.2. Controle de Volume no Windows XP.

Através do Controle de Volume podemos ajustar os volumes de diversas fontes sonoras. De especial interesse para nós são:

- *Controle de Volume ou Play Control* – Controla o amplificador de saída da placa de som. Este controle atua de forma simultânea sobre todas as outras fontes sonoras.
- *Som Wave ou Wave/DirectSound* - Controla o volume dos sons digitalizados, como por exemplo, vozes e efeitos sonoros presentes nos programas de multimídia, em arquivos WAV e jogos.
- *Entrada de linha ou Line In* - É uma entrada sonora existente nas placas de som (Line In). Através dela podemos captar sons de um VCR ou qualquer outro aparelho que produza sons.

Quando alguma das fontes sonoras da placa de som não está funcionando, verifique se os itens correspondentes do controle de volume estão habilitados (as respectivas caixas “Sem áudio” devem estar desmarcadas) e se o potenciômetro de volume está com um valor alto. Para obter um som com melhor qualidade e pouca distorção, use os potenciômetros com cerca de 80% do valor máximo.

Os ajustes mostrados nas figuras 5.1 e 5.2 estão relacionados com a reprodução de sons. Existem também ajustes relativos à gravação. Por exemplo, podemos realizar através de programas apropriados, a gravação de uma voz proveniente de um microfone juntamente com uma música de fundo proveniente de um CD ou de uma fita de VCR.

Para isto, no menu *Opções* escolhemos o item *Propriedades*. Será apresentado o quadro mostrado na figura 5.3. Selecionamos a opção *Gravação* e marcamos quais as fontes sonoras que desejamos ajustar. O programa ficará com o aspecto mostrado na figura 5.4. Note que selecionamos os itens MIDI, CD-Audio, Line-In, Microphone e Wave. Esses itens são os que aparecerão no quadro de controle de gravação, mas somente serão considerados aqueles com a caixa “Selecionar” marcada. No nosso exemplo, selecionamos apenas o microfone.

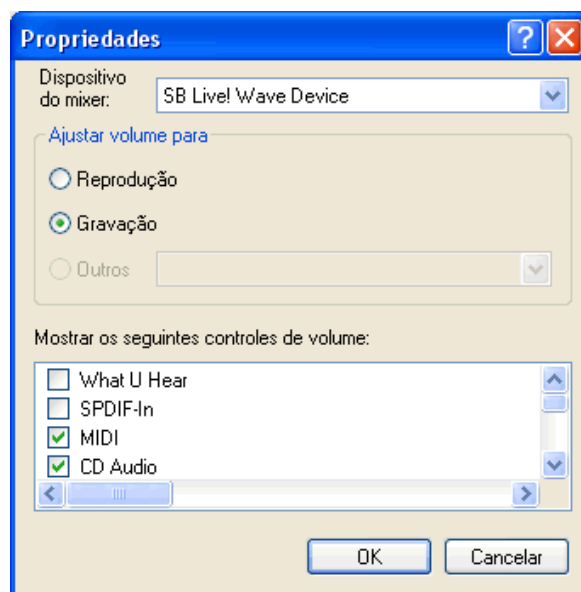


Figura 5.3. Propriedades do controle de volume.

O quadro mostrado na figura 5.4 é bem parecido com os das figuras 5.1-2. A diferença fundamental é que os primeiros dizem respeito aos controles para a reprodução sonora, e o da figura 5.4 diz respeito aos controles para a gravação. Observe que existem, logo abaixo dos

botões de controle de volume, quadros com a indicação *Selecionar*. O nome do programa também mudou de Controle de Volume (ou Play Control) para *Record Control* (ou *Controle de Gravação*).

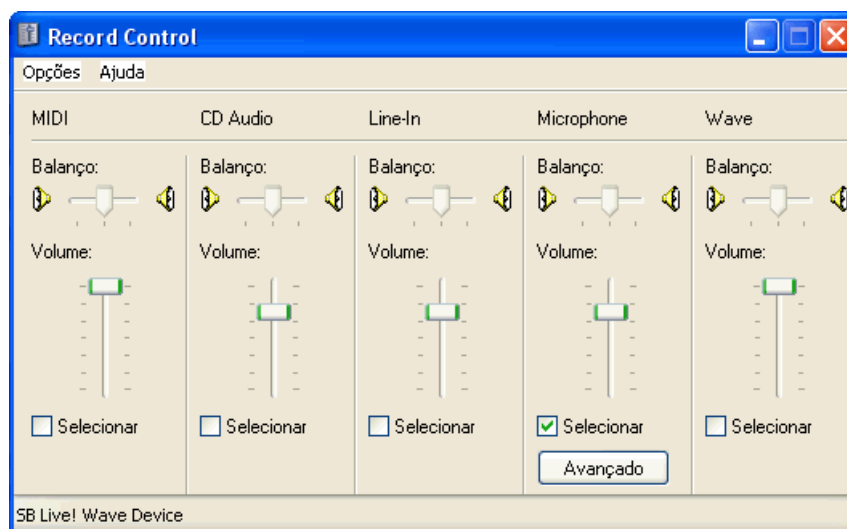


Figura 5.4. Controle de gravação.

Uma placa de som pode ter várias entradas e saídas, mas não necessariamente todas estarão representadas nos controles de volume/gravação. Através do quadro da figura 5.3 podemos especificar quais dessas entradas e saídas sonoras serão mostradas. Observe que na maioria das vezes não usamos todas essas conexões, portanto podemos configurar o programa para mostrar apenas as entradas e saídas que estamos usando.

6. O GRAVADOR DE ÁUDIO

Para que o computador possa armazenar e processar sinais sonoros, é necessário que estes sejam antes convertidos para a forma digital. Este processo é conhecido como digitalização do som, e consiste em gerar uma sequência de números que representam com máxima fidelidade possível o sinal analógico.

As placas de som possuem um circuito chamado conversor analógico-digital (A/D). Este circuito realiza amostras repetitivas do sinal sonoro, e para cada uma dessas amostras gera um número proporcional à intensidade do sinal do som. Depois de digitalizados, os sons são guardados em um arquivo sonoro. Os arquivos de extensão WAV são os mais usados nos

sistemas Windows. É importante especificar três informações antes de iniciar o procedimento de digitalização:

- Taxa de amostragem (por exemplo: 22,05 kHz)
- Tamanho da amostra (por exemplo: 16 bits)
- Número de canais (por exemplo: 2).

Essas informações resumem as principais características de um arquivo de som digitalizado. A taxa de amostragem 22,05 kHz indica que a digitalização foi feita com 22050 amostras por segundo. O tamanho da amostra é de 16 bits, isto significa que para cada amostra realizada foi gerado um número inteiro de 16 bits. A maioria dos arquivos sonoros usam amostras de 8 ou 16 bits, apesar de existirem métodos de codificação que podem utilizar outros tamanhos. Finalmente o número de canais, que pode ser 1 (mono) ou 2 (estéreo).

Todos os computadores modernos possuem circuitos de som. Esses circuitos podem estar embutidos na própria placa de CPU, neste caso é chamado de som onboard. Para a identificação se um computador possui som onboard, basta observar a presença do bloco de conectores mostrado na fig. 6.1. Este bloco possui um conector de 15 pinos, usado na conexão de joystick e de dispositivos MIDI, além de três conectores de áudio, usados para microfone (Mic), alto-falantes (Line Out) e entrada de linha (Line In). Esta entrada de linha é usada para conexão com aparelhos que possuem saída de áudio, como TV, VCR e aparelhos de som em geral.

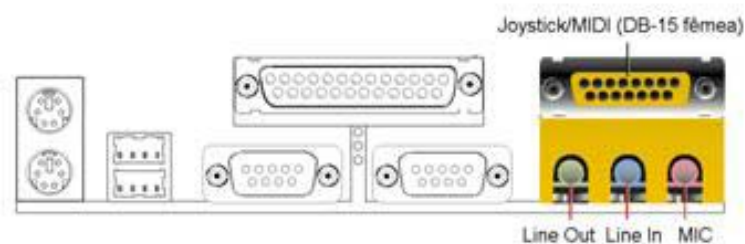


Figura 6.1

No menu *Iniciar/Programas/Acessórios/Entretenimento*, encontramos o programa *Gravador de Som* (figura 6.2). Se existir um microfone ligado à placa de som, podemos usar o botão REC e fazer uma gravação de som. A forma de onda será mostrada a medida em que o som for captado. Depois de pressionar STOP, podemos pressionar PLAY para ouvir o que foi gravado. O gravador mostrado na figura 14 é o do Windows XP, mas nas versões anteriores do Windows, este programa é idêntico.



Figura 6.2. Gravador de som do Windows.

O gravador de som do Windows é geralmente usado para fazer gravações de pequenos arquivos de som, com duração inferior a 60 segundos. Para gravar arquivos sonoros de maior duração, será preciso utilizar programas de terceiros. No Windows, todos esses programas, assim como o Gravador de Som, geram arquivos de extensão WAV.

Para executar o gravador de som do Windows, use: *Iniciar/Programas/Acessórios/Entretenimento/Gravador de som*. Use o comando *Arquivo/Propriedades* do Gravador para escolher a taxa de amostragem, número de bits, número de canais, etc. Use a seguir o Controle de Volume, para definir as fontes sonoras que serão levadas em conta na gravação. Normalmente selecionamos apenas uma, mas podemos misturar duas ou mais entradas. Feitas as escolhas, clique no botão REC, aquele com a forma de círculo, localizado na parte direita do gravador. A gravação será feita até ser completado o tempo de 60 segundos, ou até clicarmos no botão STOP (aquele em forma de retângulo, o segundo botão da direita para a esquerda).

Clique em PLAY (o botão central, com a forma de um triângulo) para ouvir o arquivo que foi gravado. Com o menu *Efeitos* podemos fazer algumas transformações no som, como aumentar/reduzir o volume.

7. ANÁLISE DOS DADOS

A explosão do balão foi gravada em 8 bits, a 22050 hz por canal, e armazenada em um arquivo Wave (WAV). A esta frequência a resolução temporal é da ordem de 0,05 ms. O instante de chegada do pulso sonoro a cada microfone foi determinado pela inspeção do arquivo Wave, o que pode ser feito praticamente com qualquer programa de edição de áudio. Nós utilizamos o *Goldwave*, shareware disponível em <http://www.goldwave.com>. A figura 7.1 mostra o sinal gravado pelos dois microfones, tal como é visto no Goldwave.

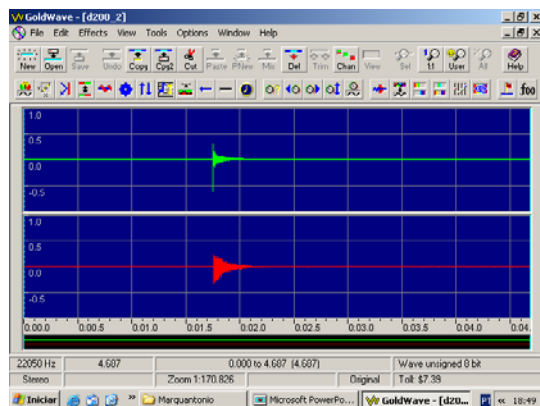


Figura 7.1. Análise do arquivo de áudio com o Goldwave.

É possível ampliar a escala de tempo, de forma a facilitar a medida do intervalo entre os dois sinais. O resultado de um *zoom* está mostrado na figura 7.2. Encontramos que o som levou 5,71 ms para ir de um microfone ao outro. Como a distância entre eles era de 2,00 metros, obtemos 350 m/s para a velocidade do som. A temperatura do laboratório no momento da medida era de aproximadamente 25°C. De acordo com a eq. 2.2, a esta temperatura a velocidade do som deve ser de 346 m/s. A diferença entre esse valor e o resultado da medida é da ordem de 1%.

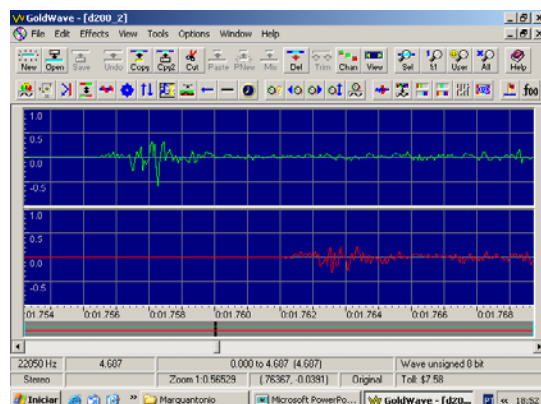


Figura 7.2. Sinal analisado com zoom.

Nós repetimos o experimento com diferentes distâncias entre os microfones, obtendo os resultados mostrados na fig. 7.3. Combinando essas medidas obtemos 347 m/s para a velocidade do som, um valor que difere da previsão da eq. 1.2 por menos de 0,3%.

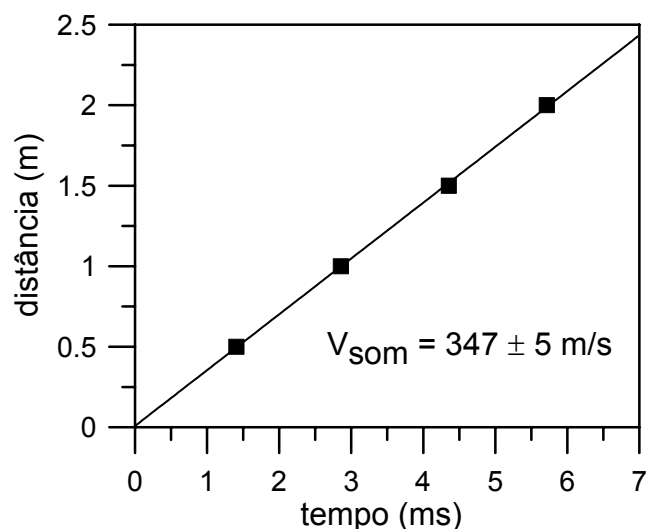


Figura 7.3. Resultados para diferentes distâncias entre os microfones.

8. COMENTÁRIOS FINAIS

Um computador com placa de som é o meio ideal para várias experiências com som, em particular as que envolvam a geração e visualização da forma de sinais sonoros. Muitas experiências que se fariam com custosos geradores de áudio, osciloscópios, etc., podem ser reproduzidas num computador dotado de recursos multimídia e provido dos aplicativos adequados. Um computador multimídia é muito mais barato, acessível e fácil de usar do que o típico equipamento de áudio. Além disso, por reunir as funções de gravação, reprodução e análise de som, o computador é excelente para demonstrações didáticas e experiências envolvendo o som.

Este trabalho é um exemplo disso. Mostramos que, com um computador e dois microfones, a velocidade do som pode ser medida com ótima precisão de uma maneira muito simples e direta. O experimento não envolve conceitos como ressonâncias ou modos normais, e conseqüentemente pode ser realizado na escola média. Finalmente, deve ser ressaltado que o experimento permite que se explore aspectos importantes da aquisição de dados em um laboratório moderno, como transdutores (o microfone) e conversores analógico-digitais (a placa de som), em um contexto familiar e atraente a muitos estudantes – o da gravação de um sinal de áudio.

APÊNDICE A

Todos os componentes para esta montagem podem ser encontrados com facilidade, inclusive o amplificador operacional 741, que se apresenta em dois tipos de invólucros. É recomendável a montagem em placa de circuito impresso em vista do menor volume ocupado e também em vista da sensibilidade do circuito à captação de zumbidos.

Os desenhos chapeados que são mostrados são feitos em função do amp-op em invólucro DIL de 8 pinos, que é o mais comum. Recomenda-se que os fios de entrada devam ser blindados a fim de se também minimizar a captação de zumbidos. Do mesmo modo o fio de saída de conexão do amplificador deve ser também blindado. A figura A1 mostra o circuito impresso que montamos.

O CIRCUITO IMPRESSO

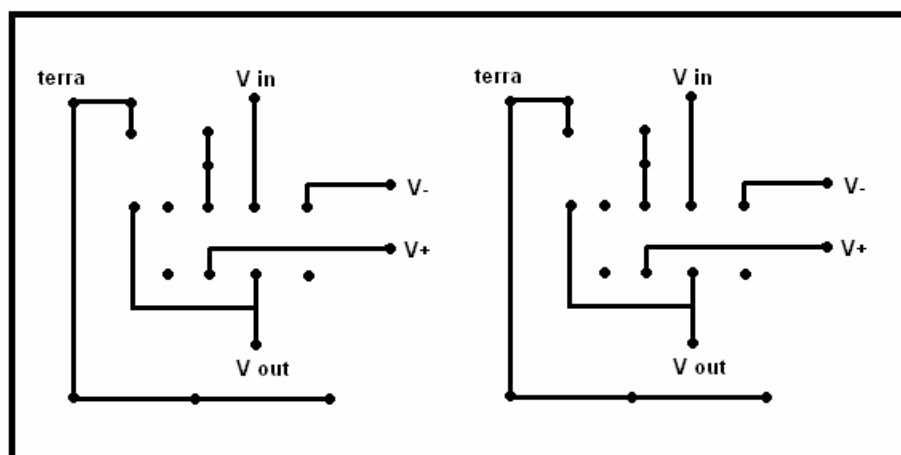


Figura A1

Na figura A2 vemos o circuito amplificador, alimentado por 2 baterias de 9V.

MONTAGEM E CONEXÕES

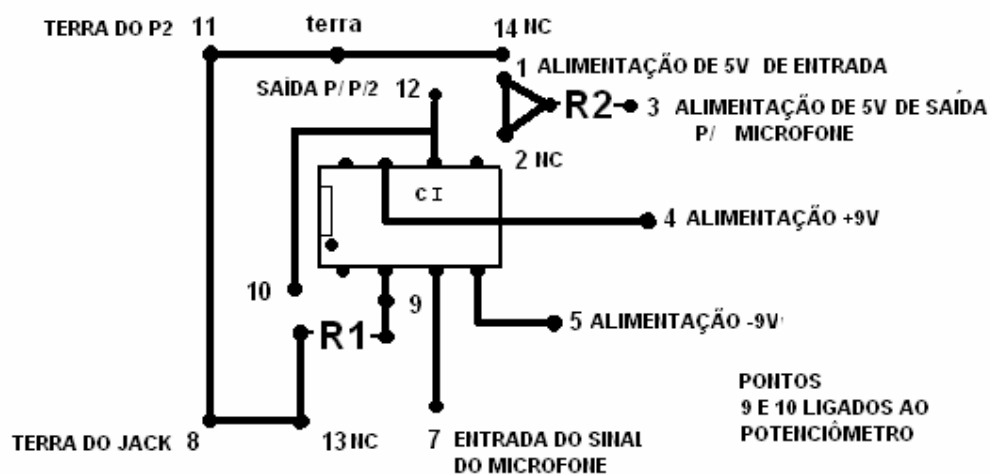


Figura A2

Cada ponto na figura A2 está relacionado está especificando o respectivo número do fio (ligando um ponto ao outro) na montagem do circuito. Estes são:

1. +5 V (alimentação dos microfones);
2. Nc;
3. +5 V (alimentação p/ o microfone);
4. +9 V (alimentação p/ o amp.op.);
5. -9 V (alimentação p/ o amp.op.);
6. Nc
7. V in (sinal do microfone);
8. Terra;
9. Ligação p/ o potenciômetro;
10. Ligação p/ o potenciômetro;
11. Terra do P2;
12. Sinal de saída p/ o line-in;

As resistências usadas são:

R1- 1,20 K Ω ;

R2- 2,00 K Ω ;

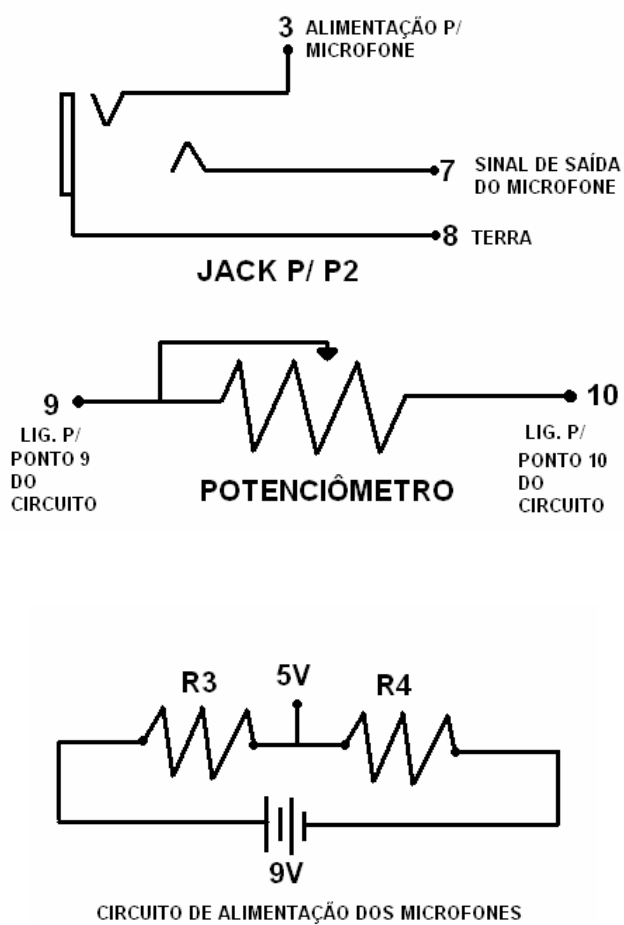
R3- 1,00 K Ω ;

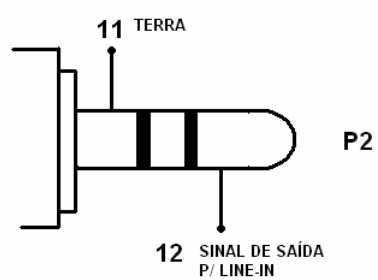
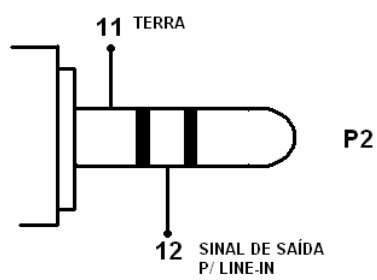
R4- 1,25 K Ω ;

e o circuito integrado (amp.op.) é

CI - μ A741.

Os elementos usados nas conexões numeradas estão mostrados abaixo.





REFERÊNCIAS

[1] D.A. Bohn, *Environmental effects on the speed of sound*, J. Audio Eng. Soc. 36, 223–31 (1988)

Medidas da velocidade do som por ressonância:

[2] M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavoraro, *Medir a velocidade do som pode ser rápido e fácil*, Física na Escola 4, 29 (2003)

[3] W.P. Silva *et al.*, *Velocidade do som no ar: um experimento caseiro com microcomputador e balde d'água*, Revista Brasileira de Ensino de Física 25, 74 (2003).

[4] J. A. Warden, *Measuring the Speed of Sound without Plumbing*, The Physics Teacher 43, 308 (2005)

[5] B.E. Martin, *Measuring the speed of sound – variation on a familiar theme*, The Physics Teacher 39, 424 (2001)

[6] J. K. Eddy, J. N. Fox, N. W. Gaggini, D. Ramsey, T. Kirkpatrick, *The velocity of sound in a closed tube*, American Journal of Physics 55, 1136 (1987)

[7] S. Velasco, F. L. Román, A. González, J. A. White, *A computer-assisted experiment for the measurement of the temperature dependence of the speed of sound in air*, American Journal of Physics 72, 276 (2004)

Medidas diretas da velocidade do som:

[8] V. B. Barbeta, C. R. Marzulli, *Experimento didático para determinação da velocidade de propagação do som no ar, assistido por computador*, Revista Brasileira de Ensino de Física 22, 447 (2000)

[9] R. S. Worland, D. D. Wilson, *The speed of sound in air as a function of temperature*, The Physics Teacher 37, 53 (1999)

[10] R. E. Berg, D. R. Brill, *Speed of Sound Using Lissajous Figures*, The Physics Teacher 43, 36 (2005)

[11] I. H. A Pettersen, *Speed of Sound in Gases Using an Ultrasonic Motion Detector*, The Physics Teacher 40, 284 (2002)

[12] J. C. Albergotti, *Speed of sound by a time-of-flight method*, American Journal of Physics 49, 595 (1981)

[13] P. J. Ouseph, J. J. Link, *Variation of speed of sound in air with temperature*, American Journal of Physics 52, 661 (1984)

[14] D. P. Donnelly, M Bechard, *Wind velocity from audio phase shift measurements*, American Journal of Physics 54, 379 (1986)

[15] D. E. Hall, *Wind velocity and temperature from audio phase shift*, American Journal of Physics 55, 761 (1987)

[16] D. S. Gale, *Measuring the speed of sound*, American Journal of Physics 48, 498 (1980)

[17] G. B. Karshner, *Direct method for measuring the speed of sound*, American Journal of Physics 57, 920-922 (1989)

[18] L. Yarmus, *Pulsed waves: Reflections and the speed of sound*, American Journal of Physics 64, 903 (1996)

Sobre o circuito amplificador:

[19] Revista Saber Eletrônica, Ed. Fevereiro de 1981

[20] Powering microphones,

http://www.hut.fi/Misc/Electronics/circuits/microphone_powering.html

[21] 741 Op-amp characteristics,

<http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/electronic/a741p.html/>

[22] Using the Sound Board As an Analog-to-digital Card, K.Hansen, M. Harnetiaux, and P.B.Siegel, Physics Department, California State Polytechnic